第64卷 第2期 天 文 学 报 Vol. 64 No. 2
2023年3月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Mar., 2023

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2023.02.008

早型旋涡星系M81 (NGC 3031)的形态学解构研究*

龚俊宇[1,2] 毛业伟[1,2†]

(1 广州大学天体物理中心 广州 510006)
(2 广州大学物理与材料科学学院天文系 广州 510006)

摘要 利用星系解构软件GALFIT通过面亮度轮廓拟合对近邻早型旋涡星系M81 (NGC 3031)进行形态学解构, 旨在探究M81星系的结构组成并对其进行形态学量化. 通过6种解构模式, 对M81进行了不同复杂程度的结构分解, 其中最复杂的解构模式包含核球、盘、外旋臂、内旋臂、星系核5个子结构. 研究结果显示, M81有一个Sérsic指数约为5.0的经典核球, 其形态和光度在不同解构模式中均保持稳定; M81星系盘的Sérsic指数约为1.2, 但它的形态参数和光度与是否分解内旋臂相关. 不同子结构的组合对作为混合体的星系整体的形态有不可忽视的影响. 星系解构的结果提供了不同解构模式适用性的建议: 其中核球+盘+星系核的三成分解构适用于大样本星系的核-盘研究; 而考虑旋臂的复杂解构则适合于对星系子结构的精确测量, 如小样本(或个源)研究. 基于Spitzer-The Infrared Array Camera (IRAC) 4.5 μm的单波段图像的形态学解构研究是后续一系列研究的开始, 在此基础上未来将会对M81进行多波段解构, 同时研究不同子结构的光谱能量分布和星族性质, 并推断M81各子结构的形成历史和演化过程.

关键词 星系: 个别: M81, 核球, 星系: 基本参数: 形态学, 星系: 结构, 星系: 旋涡
中图分类号: P157; **文献标识码**: A

1 引言

星系的形态是星系最直接的观测表征. 决定星系形态的主要因素是星系的形成和演化[1–3]. 例如椭圆星系(或球状星系)通常被认为是通过短时标的剧烈过程(如并合)形成的, 这种合并的机制加速了星系内部气体的坍塌导致星暴而产生大量恒星, 并且打破原本星系内部秩序的恒星轨道从而形成球体结构, 整体形态相对光滑, 没有断裂或其他子结构; 恒星运动以随机运动为主, 速度弥散比较大[4–7]. 盘主导的星系则被认为是由长时标的吸积过程而形成的轨道有序的恒星系统, 在伴星系或其他不对称引力势的影响下, 可能产生旋臂或其他子结构, 恒星运动以统一的旋转为主, 速度弥散小[8–9]. 不同的形成过程在星系中产生了不同性质的恒星. 椭圆星系中主要是年老恒星族, 恒星形成活动水平低, 星系整体颜色偏红; 盘星系中的恒星族通常更年轻, 星系整体颜色偏蓝, 恒星形成率相对更高. 研究星系的形态是认识星系中恒星族性质, 了解星系形成和演化的基础.

一个星系也常常由多个不同形态的子结构组

2022-04-11收到原稿件, 2022-04-28收到修改稿
*国家自然科学基金项目(U2031106、U2031201)资助
†ywmao@gzhu.edu.cn

成, 尤其是对于盘星系来说, 其主要子结构是核球、盘和旋臂. 盘星系的核球有着和椭圆星系相似的观测特征, 它们有相似的面亮度轮廓[10–11]; 这意味着核球可能和椭圆星系一样是由短时标的剧烈过程(如并合)产生. 早型旋涡星系在其演化早期就形成了核球, 而盘结构可能是通过后期吸积气体而产生的子结构[12]. 旋臂结构通常是星系中驱动气体的重要动力来源, 旋臂会聚集星系中的气体, 从而会产生大量的恒星形成区和年轻恒星[13]. 不过旋臂的形成有不少争议, 不少天文学家认为旋臂是由于盘受到局部的扰动而产生的[14–16].

对于由不同子结构组合而成的星系, 其整体性质是不同子结构性质的综合, 也就是说, 星系中的子结构会影响作为各种子结构混合体的星系整体的性质. 例如, 一部分绿谷星系其实就是由恒星形成率高的盘和恒星形成率低的核球平均作用的结果[12]; 而常见的星系颜色的双峰性也是由于核球和盘的各自特征的表现[17]. 不同子结构的混合而造成的星系物理参数估计偏差可能导致对星系形成和演化理解的错误. 如果对星系进行解构, 分别研究不同子结构各自的性质则可以有效地降低子结构混合带来的不确定性.

对星系子结构的形态进行量化是星系解构的基础, 而面亮度径向轮廓拟合则是最常用的量化子结构形态的工具, 因为不同形态的恒星系统, 其面亮度径向轮廓遵循不同的函数形式[18–20]. 对于内部恒星以随机运动为主的球状系统(如椭圆星系或盘星系的经典核球, 它们遵循基本盘理论[21]), 其面亮度径向轮廓大致符合de Vaucouleurs定律(即$r^{1/4}$定律)[22], 函数形式如下:

$$\Sigma\left(r\right)=\Sigma_{\rm e}\exp\left\{-7.67\left[\left(\frac{r}{r_{\rm e}}\right)^{1/4}-1\right]\right\}, \quad (1)$$

其中, r为星系中的径向距离, $r_{\rm e}$为有效半径, $\Sigma(r)$表示在径向距离r处的面亮度, $\Sigma_{\rm e}$表示在有效半径$r_{\rm e}$处的面亮度[10–11].

盘状系统的面亮度径向轮廓则更倾向于遵从指数函数, 因此将这种盘结构称为“指数盘(Exponential Disk)”[23], 函数形式如下:

$$\Sigma\left(r\right)=\Sigma_0\exp\left(-\frac{r}{r_{\rm s}}\right), \quad (2)$$

其中, Σ_0表示系统中心的表面亮度, $r_{\rm s}$表示盘的标度长度(Scale Length).

然而, 无论是用$r^{1/4}$定律拟合球状系统, 还是用指数定律拟合盘状系统, 通常都很难得到理想的拟合结果. 在这种情况下, 人们发展了一个更加灵活的函数—Sérsic函数—来拟合星系的面亮度[24], 函数形式如下

$$\Sigma\left(r\right)=\Sigma_{\rm e}\exp\left\{-\kappa\left[\left(\frac{r}{r_{\rm e}}\right)^{1/n}-1\right]\right\}, \quad (3)$$

其中指数n称为“Sérsic指数”, 表示亮度的集中程度; κ是与n有关的系数(因此不属于独立的自由参数). 可以看出, Sérsic函数把$r^{1/4}$定律和指数定律做了一个统一, 也就是当Sérsic指数n等于4 (此时的κ等于7.67)时, Sérsic函数就是$r^{1/4}$定律; 当Sérsic指数n等于1时, Sérsic函数就是指数定律($r_{\rm e}=1.678r_{\rm s}$). Sérsic函数把指数n作为自由参数, 能够更加灵活地拟合星系面亮度的径向轮廓. 由于这样的灵活性, 因此能够得到更加理想的拟合结果. 目前, Sérsic函数是最常用的星系面亮度径向轮廓拟合函数, 包括对于星系不同子结构的拟合. 星系形态学解构软件的问世使得人们能够非常便利地分离星系中的各结构成分并对其进行形态学量化[25–29].

然而, 星系形态学解构结果中的不确定性是该类工作的主要问题之一, 解构过程的主观性和可变性比较强. 不同目标的星系形态学解构其模式和结果可以是完全不同的. 对于盘/旋涡星系, 人们通常采用核球+盘的解构模式, 不过这种两成分模式可能过于简单, 在分离后的剩余图像中会留有旋臂等其他子结构成分. 这些剩余的子结构如果没有被纳入独立的形态学成分是否会对拟合造成比较严重的影响? 此外, 有些星系的中心有活动星系核(Active Galactic Nucleus, AGN), AGN的存在会如何影响星系的形态学解构结果; 同时, 不同的解构模式又会对作为独立成分的AGN产生怎样的影响? 不同科研目标的工作应该要如何选择适合自身的星系解构模式?

为了回答这些问题, 我们开展了这项对早型旋涡星系M81 (NGC 3031)的形态学解构工作, 以量化M81的形态学结构组成, 并探究不同的形态学解

构模式对星系子结构拟合结果的影响. M81的形态学分类是SAab型, 距离地球约3.6 Mpc (兆秒差距), 视角尺度约为26′ × 14′. 近距离、大角尺度使得对M81的研究可以在本征高空间分辨率的条件下展开. 迄今为止, 已经有许多工作对M81的多种性质进行了研究, 包括星族成分[30–32]、尘埃分布[33–36]、形态学[37–39]等. 本文呈现的工作是对M81单波段形态学进行的深入研究. 以这项工作为基础, 我们后续的工作将对M81进行多波段形态学解构, 并系统研究M81各子结构的光谱能量分布(Spectral Energy Distribution, SED)、星族性质以及星系整体和各子结构的形成和演化过程.

我们将在第2节介绍数据来源和图像处理的方法, 第3节中介绍星系形态学解构的过程, 解构的结果将会在第4节展示, 并在第5节进行讨论, 第6节将对本工作的结论进行总结. 在本文中, 1′的物理尺度约等于1 kpc.

2 数据来源及其初步处理

2.1 数据的获取

由于M81是著名的近邻星系, 因此各波段的观测数据都很丰富. 在本工作中, 我们选择分辨率高且受到恒星形成区、不规则团块结构、尘埃辐射影响比较小的Spitzer-The Infrared Array Camera (IRAC) 4.5 μm的图像数据[1]. 数据的来源是The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S^4G)项目[40–42], 可在National Aeronautics and Space Administration (NASA)/Infrared Processing and Analysis Center (IPAC) Infrared Science Archive (IRSA)[2]官网中下载.

除了Spitzer-IRAC 4.5 μm的图像数据, 本工作也用到来自Galaxy Evolution Explorer (GALEX) Far ultraviolet (FUV)的图像数据, 作为构建旋臂模型的参考[43]. 因为旋臂主要由年轻恒星族组成, 选择GALEX FUV波段能够最大化消除年老恒星族对旋臂结构建模的影响. 该观测波段数据来源于GALEX data release 6 (DR6)[3], 可在GALEX Guest Investigator[4]官网中下载.

在本工作中, GALEX FUV图像只用来作为旋臂参数建模的参考, 星系的全部形态学解构过程以及所有结果都是基于Spitzer-IRAC 4.5 μm图像. 图1是M81在GALEX FUV和Spitzer-IRAC 4.5 μm两个波段的图像. 本节的以下内容陈述了形态学解构前的初步图像处理.

2.2 银河消光改正

首先我们对图像进行银河消光改正. 我们采用了Fitzpatrick[44]在1999年的尘埃消光模型, 其中选择消光与总消光的比R_V取值为3.1, M81在V波段的银河消光值为0.220 mag (Magnitude, 星等)[45]. 银河消光改正的具体过程由名为`extinction`[5]的`Python`程序包完成.

2.3 背景噪声扣除

虽然Spitzer的S^4G项目已经“官方地”进行了背景噪声扣除, 但是他们扣除的背景噪声是常数值, 不适用于背景不均匀的图像. 特别是, 面亮度径向轮廓拟合对背景非常敏感[46], 因此我们需要构建一个二维背景噪声模型用于背景噪声的扣除.

背景噪声的扣除首先需要识别背景像素. 我们用图像阈值区分(Image Segmentation)的方法, 以3倍标准偏差、5个连接像素为阈值来识别所有信号源并将其标记出来, 这样就对图像中信号源像素和背景像素做了区分.

将背景像素识别出来以后, 所有背景像素都将用于构建二维背景模型, 而所有信号源像素都被排除在背景之外. 二维背景模型的构建利用背景像素取bin的方法计算局部变化背景的尺度大小[47]. 该方法的具体操作是将背景像素进行取bin, 通过计算不同取bin窗口下的背景像素的直方图来确定局部背景的尺度. 图2中的黑色实线表示原始背景图像的概率分布直方图. 我们尝试了5–30的不同取bin窗口. 随着取bin窗口的升高, 背景像素的直方图

[1] Spitzer-IRAC 3.6 μm的M81图像受到饱和像素的影响, 因此本工作没有选择这个波段.
[2] https://irsa.ipac.caltech.edu/frontpage/.
[3] http://www.galex.caltech.edu/researcher/data.html.
[4] https://asd.gsfc.nasa.gov/archive/galex/.
[5] http://github.com/kbarbary/extinction.

将会变得越来越狭窄; 同时直方图的均值会趋于稳定, 直到不再变狭窄, 因为这时局部的背景像素会全部被取bin进同一个像素中. 我们发现只要取bin窗口大于20就可以达到直方图趋于稳定的效果. 图2中的黑色虚线表示取bin窗口为20的背景图像的概率分布直方图.

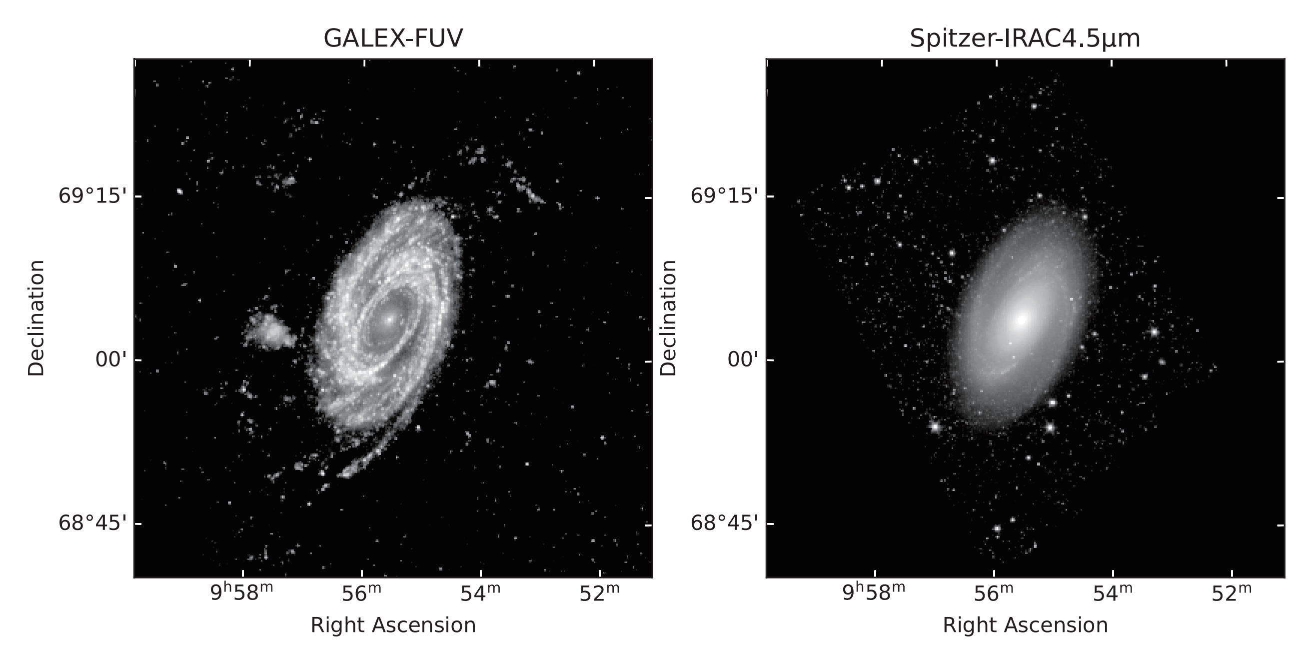


图 1　M81在GALEX FUV (左图)和Spitzer-IRAC 4.5 μm (右图)的图像, 附空间坐标以展示空间尺度.

Fig. 1　The GALEX FUV (left panel) and Spitzer-IRAC 4.5 μm (right panel) images for M81, with coordinate superimposed for indicating the spatial scale.

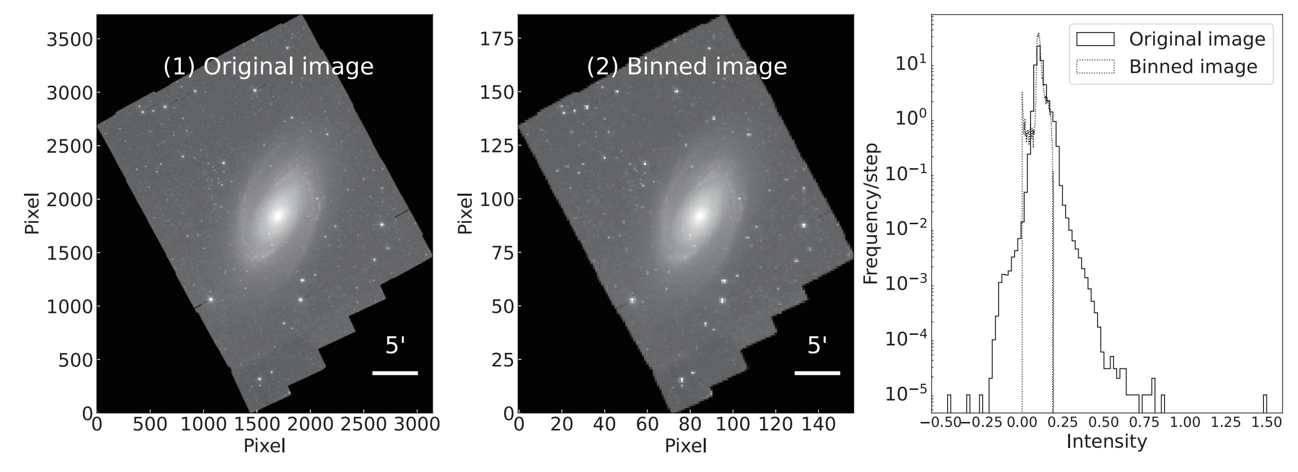
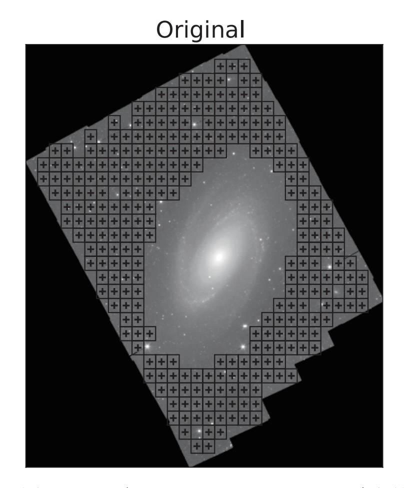


图 2　M81在Spitzer-IRAC 4.5 μm波段的原始图像(左图)、取bin后的图像(中图, 取bin窗口为20)、像素频率分布直方统计图(右图). 右图展示了观测图像的背景像素(黑色实线)与取bin窗口等于20的背景像素(黑色虚线)的像素频率分布直方图.

Fig. 2　The original (left panel) and binned (middle panel, with a 20-pixel window) images for M81 at the Spitzer-IRAC 4.5 μm band. The right panel shows the pixel frequency distribution histogram of the background pixel in the observation image (black solid line) and the binned image with a binned window equal to 20 (black dotted line).

得到局部背景的尺度大小以后, 我们将观测图像分割成多个矩形的子区域, 这些子区域的大小要足够包进前景星, 但是也要小于局部背景. 通过实验我们取相对保守的124 pixel × 104 pixel的区域. 随后将每个这样的区域合并成一个像素, 并赋值该区域所有像素的3倍标准偏差的中值, 其中我们舍弃掉背景像素数量占比小于90%的区域, 随后形成一个低分辨率的二维背景图像. 最后用双三次插值, 将该低分辨率的二维背景图像还原成与原始图像尺寸大小相同的背景模型图像, 随后用原始图像减去背景模型图像即可得到背景扣除后的数据. 在此我们将背景不确定性定义为背景扣除产生的不确定性, 也就是扣除背景后的所有背景像素值的标准偏差. 背景扣减结果在图3中展示. 本工作对星系M81的形态学解构研究基于扣除背景后的图像开展.





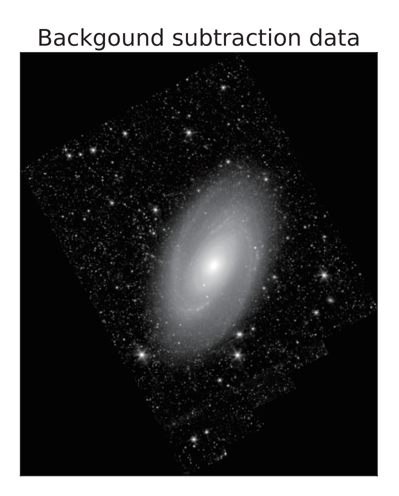


图 3 M81在Spitzer-IRAC 4.5 µm波段的观测图像(左图)、背景模型图像(中图)、扣除背景之后的图像(右图). 左图中黑色方框表示用于背景模型建模所用到的局部背景的区域, 黑色区域是没有观测的区域. 为了清楚显示背景的空间变化, 我们增强了背景图像的对比度.

Fig. 3 The observed (left panel), modeled background (middle panel), and background-subtracted (right panel) images for M81 at the Spitzer-IRAC 4.5 µm band. In the left panel, black boxes represent the area sampled for background modeling, and the black area was not observed. In order to clearly show the spatial variation in the background, we enhance the contrast scale for the background image.

3 星系图像形态学解构的处理过程

在本工作中, 我们利用GALFIT软件[25, 28]进行星系形态学解构. 除了需要输入待解构图像, GALFIT还要求输入屏蔽图像(Mask Image)、噪声图像(Sigma Image)以及点扩散函数图像(Point Spread Function Image). 本节将介绍这些图像的制作以及我们采用的星系解构模式.

3.1 屏蔽、噪声和点扩散函数图像的制作

屏蔽图像用来将某些像素排除使之不参与拟合, 目的是消除其他亮源以及图像中的坏像素对星系解构产生的影响. 被屏蔽的目标包括前景星、非数字信号以及饱和像素等.

前景星是主要的屏蔽目标. 我们的工作中前景星分为两类: 一类是M81覆盖天区之外的前景星(不与星系重叠), 另一类是与M81重叠的前景星. 因此探测前景星之前需要提前确定M81覆盖的天区范围. 我们利用等照度线(Isophote)来确定M81覆盖的天区范围. 在拟合出M81的椭圆等照度线之后, 我们将亮度等于背景不确定性的那个标准椭圆等照度线作为M81的边缘, 该椭圆的中心位置是Right Ascension (RA) = 148.888221°、Declination (Dec) = 69.065295°、半长轴为750″、半短轴为450″、方位角为−20° (该椭圆也是后续对星系进行孔径测光时的椭圆孔径). 所有在此椭圆以外的前景星将会用图像阈值区分的方法来标记, 该方

法已在第2.3节中描述.

对于椭圆孔径内的前景星, 我们采用局部探测法. 该方法类似于第2.3节中采用的方法, 我们将椭圆内部分成多个子区域; 随后我们在每个子区域设置一个阈值, 将高于该阈值的像素定义为前景星, 该阈值根据不同的子区域设置; 最后肉眼检查, 有必要的话人为地手动添加标记和去标记. 除了前景星以外, 其他屏蔽目标由人工标记.

图4中展示了去除所有前景星的M81图像用以检查屏蔽效果. 该图像的制作方法是利用观测图像中前景星周围像素的中值替换屏蔽图像标记出来的前景星的像素值.

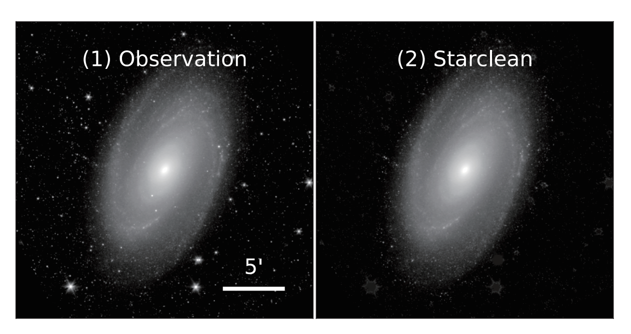


图 4 M81在Spitzer-IRAC 4.5 μm波段的观测图像(左图)和去除前景星后的图像(右图)的展示. 两张图的空间尺度相同.

Fig. 4 Observed (left panel) and star-cleaned images (right panel) for M81 at the Spitzer-IRAC 4.5 μm band. The two images have the same physical scale.

GALFIT的拟合原理是最小二乘法, 需要输入噪声图像参与最小二乘计算. 噪声图像包含泊松噪声和读出噪声, 遵循以下公式:

$$\sigma_{\rm e}^2 = \sigma_{\rm P}^2 + \sigma_{\rm R}^2 \,, \tag{4}$$

$$\sigma_{\rm P} = \sqrt{I_{\rm e}} \,, \tag{5}$$

其中$\sigma_{\rm e}$表示输入的噪声图像, $\sigma_{\rm P}$表示泊松噪声, $\sigma_{\rm R}$表示读出噪声, $I_{\rm e}$表示以电子为单位的未扣除背景的观测图像[6]. 计算泊松噪声的以电子为单位未扣除背景的图像需要通过图像文件头(Header)中的GAIN (CCD的增益)参数来得到. 读出噪声由Header中的RONOISE参数记录. 由此公式计算出的噪声图像还需要转换成与观测图像相同的单位[48].

PSF图像在GALFIT对星系的形态学解构中有两个用处. 一是用于拟合图像中的点源, 二是对模型图像进行卷积以改变其空间分辨率.

本工作中PSF图像制作的方法是尽可能多地找到背景扣除后图像中的没有坏数据、孤立(附近没有其他亮源污染)、相对不太亮的前景星作为样本, 通过多次迭代制作出一个有效点扩散函数(Effective Point Spread Function, ePSF)模型图像[49], 其中的前景星样本需要切片, 并且要求前景星在切片正中. ePSF模型好坏可以通过GALFIT拟合来检验, 就是查看GALFIT是否能只用一个ePSF模型来很好地拟合图像中的前景星, 若残差图像中没有该前景星像素的明显遗留则说明ePSF模型可靠.

图5中展示了我们通过以上方法和步骤制作出的屏蔽图像、噪声图像以及ePSF图像. 具体操作由名为photutils[7]的Python软件包实现.

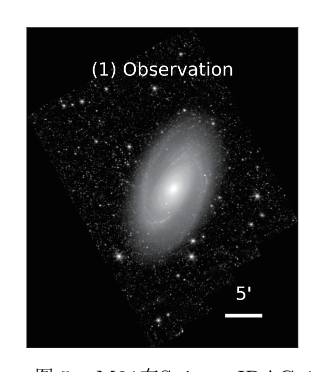
3.2 M81的形态学解构模式

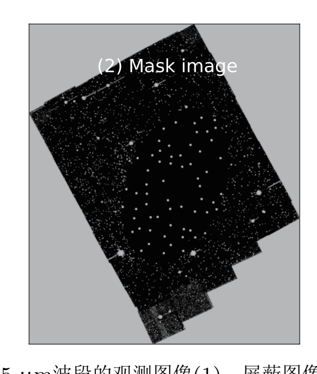
本节的内容包括描述在星系解构过程中需要拟合的子结构、如何选择函数、如何建模以及模型好坏的判定. 核球和盘是星系中最常见的基本子结构, 他们在星系中的质量和光度的占比非常高, 很大程度上决定了星系的形成和演化. 本工作的科学目标是探究M81的子结构, 并且对这些子结构的形态参数进行量化. 工作中我们把核球和盘作为M81的基本子结构, 在不同的解构模式中, 我们添加不同的函数来拟合其他子结构. 多种解构模式有助于调查不同子结构的拟合对核球和盘的形态学参数结果的影响.

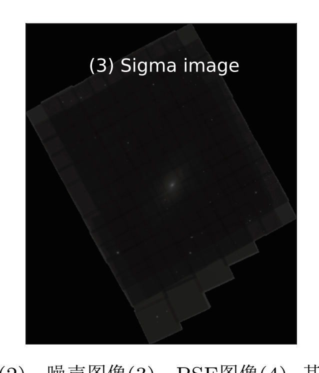
GALFIT中内置了许多函数, 包括Sérsic函数、指数函数(指数函数在GALFIT中简称为“Expdisk”函数, 下文我们用“Expdisk”表示对盘结构进行拟合的指数函数)、高斯函数、点扩散函数等, 这些函数被称为“基础模型函数”, 其中Sérsic函数是最常用的描述系统径向面亮度轮廓的函数, 函数形式

[6]https://users.obs.carnegiescience.edu/peng/work/GALFIT/GALFIT.html.
[7]https://photutils.readthedocs.io/en/stable/index.html.

如(3)式, 由于其较高的自由度因此可以广泛地用于不同子结构包括但不限于核球、盘、星系棒等的建模; Expdisk函数是Sérsic函数的Sérsic指数等于1的特殊形式; 高斯函数是Sérsic函数的Sérsic指数等于0.5的特殊形式. 基础模型函数用来拟合面亮度均匀规则的子结构. 为了拟合旋臂、环等面亮度不均匀、不规则的子结构, GALFIT内置了分别为方位函数(Azimuthal Function)和截断函数(Truncation Functions)的两种"高级函数". 这两种高级函数不能单独使用, 需要叠加在某个基础模型函数上, 其作用是将基础函数修改成特殊的不规则形状. 方位函数中包含一个坐标旋转函数, 通过将其叠加在基础函数上可以产生旋臂的结构; 截断函数通过截断基础函数从而产生环结构或者断裂的效果.







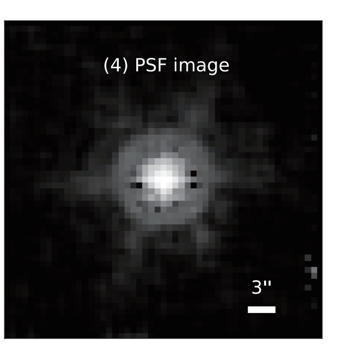


图 5 M81在Spitzer-IRAC 4.5 μm波段的观测图像(1)、屏蔽图像(2)、噪声图像(3)、PSF图像(4), 其中图(1)、(2)、(3)的物理尺度相同.

Fig. 5 Observed (1), mask (2), sigma (3), and PSF (4) images for M81 at the Spitzer-IRAC 4.5 μm band, where the physical scales in the images (1), (2), and (3) are the same.

M81除了核球和盘这两种子结构以外, 还有两条非常宏伟壮观的旋臂; 星系中心也有一个AGN[50]; 此外, 核球中存在一个若隐若现的类似旋臂的子结构[51]. 我们将会对这些子结构依次建模. 我们选择自由度高也是最常用的Sérsic函数作为以上所有子结构的基础函数, 另外在Sérsic函数的基础上叠加坐标旋转函数或者截断函数来构建旋臂结构、用PSF函数来拟合星系中心AGN结构. 有很多工作都是利用Expdisk函数来拟合星系盘, 我们在解构中没有遵循这个传统, 因为盘的Sérsic指数也是我们想探寻的参数, 特别是检查不同子结构拟合对盘的集中度的影响.

所有这些模型在图像中的坐标遵循椭圆的分布. 在拟合旋臂时, 坐标旋转函数用于将原本按照椭圆分布的每个像素的坐标强制按照新的方式重新分布, 相当于对原本的椭圆函数进行扭曲, 因此可用来拟合不同形态的旋臂结构. M81的外旋臂在IRAC 4.5 μm波段的亮度相对比于核球和盘来说并不太高. 为了保证构建出合理的外旋臂模型, 我们利用旋臂结构异常明显的GALEX-FUV图像作为参照. 从图1中可以看到外旋臂并不与核球直接接壤, 而是旋臂内部存在明显的"空区", 因此我们在构建外旋臂的时候需要考虑截断. 在拟合M81的外旋臂时, 我们将坐标旋转函数和截断函数分别叠加在Sérsic函数上来构建旋臂结构. 我们先在GALEX-FUV上拟合外旋臂模型, 然后把这个模型应用在IRAC 4.5 μm图像进行拟合.

本工作中的坐标旋转函数的形式为幂律双曲正切坐标旋转, 函数表达式如下:

$$\theta(r) = \theta_{\rm out} \tanh\left(r_{\rm in}, r_{\rm out}, \theta_{\rm incl}, \theta^{\rm sky}_{\rm P.A.}; r\right) \times \left[\frac{1}{2}\left(\frac{r}{r_{\rm out}}+1\right)\right]^{\alpha}, \tag{6}$$

其中, $\theta(r)$表示半径r处的旋转角度; $r_{\rm in}$表示旋臂开始的径向距离, 而$r_{\rm out}$表示旋臂结束的径向距离; 当r小于$r_{\rm out}$时旋臂形式主要由tanh函数控制的, 幂律相控制的是$r_{\rm out}$之外旋臂特征, α是幂律斜率; $\theta_{\rm out}$表示旋臂结束的径向距离$r_{\rm out}$处的旋转角度, 因此旋臂的缠绕松紧程度由$\theta_{\rm out}$和$r_{\rm out}$共同控制;

当r小于旋臂起始的径向距离$r_{\rm in}$时$\theta(r)$几乎为常数, 常用于拟合星系棒; 对于无棒星系, $r_{\rm in}$常常被设置为0; 旋臂盘面的倾斜角度是$\theta_{\rm incl}$, 而$\theta^{\rm sky}_{\rm P.A.}$是方位角, 这两个参数共同定义模型在天球上的投影.

本工作中的截断函数的数学表达式为:

$$P(x,y)=\tanh(x,y;x_0,y_0,r_{\rm break},\triangle r_{\rm soft},q,\theta_{\rm P.A.})\,, \tag{7}$$

其中$P(x,y)$表示在坐标(x,y)处的截断因子, 截断函数通过分别将截断因子P或$1-P$与截断内部或截断外部的原始流量分布相乘来截断模型. (x_0,y_0)是中心坐标, q是轴比, $\theta_{\rm P.A.}$是截断函数的方位角(PA); $r_{\rm break}$是断裂半径, 表示截断模型流量到该半径处会下降至其原始流量99%; $\triangle r_{\rm soft}$为缓冲长度, 被定义为$r_{\rm soft}-r_{\rm break}$或$r_{\rm break}-r_{\rm soft}$分别用于外部截断或内部截断, 其中$r_{\rm soft}$是被截断的模型流量下降到其原始流量的1%的半径.

除了以上用于拟合延展的结构的函数以外, PSF函数是最常用于拟合点状结构的函数. 不过不同数据可能表现出完全不同的PSF形状, 因此`GALFIT`需要用户自行提供PSF图像来拟合点源结构或者用于图像的卷积. 本工作中的PSF的模型图像来自在第3.1节中制作的ePSF图像.

在开始星系解构之前, 需要人为提供一个模板文件, `GALFIT`软件需要读取该文件后才能运行. 模板文件包括两部分, 分别是限制拟合过程的参数和模型函数的初始猜测值. 对于`GALFIT`需要人为地输入一些限制拟合过程的参数, 例如拟合窗口大小、PSF卷积盒大小等, 所有的这些参数我们都会根据`GALFIT`官网的Frequently Asked technical Questions (FAQ)中的建议来设置. 其中拟合窗口和PSF卷积核的大小很大程度上可能影响拟合时间和拟合的准确性, 原则上拟合窗口和PSF卷积核窗口大小都要尽可能大, 以便完全容纳目标星系和PSF的所有像素; 但是太大的拟合和卷积核窗口会降低拟合的速度, 因此选择合适的拟合和卷积核窗口能提高拟合的效率. 我们的图像有足够大的视场, 因此拟合窗口我们选择2000 pixel × 2000 pixel, 这个尺度足以包括M81全部以及很大一部分背景区域; 卷积核设置80倍的图像PSF的半高全宽, 像素尺度和测光零点遵循Spitzer望远镜手册设置为0.75″/pixel和18.32 mag.

在开始进行形态学解构拟合之前, 还需要设定模型的初始参数. 初始参数对于相对简单、没有用到坐标旋转和截断函数的模型来说影响不大, 特别是对于单Sérsic函数的拟合, 即使初始参数的设置极端不合理, 最后都能稳定地得到同一个结果. 然而, 对于坐标旋转和截断函数, 初始参数的设置会对`GALFIT`的拟合产生影响. 以我们在本工作中得到的经验来说, 初始参数影响坐标旋转和截断函数拟合的时间长短, 合理的参数猜测通常带来更短的拟合时间. 对于参数的设置, 我们采取一个相对经验的方法来估计所有函数的初始参数值: 在输入初始参数前人为创建一个和目标看起来相像的人工模型. 这个人工模型的构建是通过人为手动调节参数得到, 通过输出该图像和视觉检查, 确保人工模型图像和目标相似. 例如人工模型比目标更亮就降低亮度, 人工模型比目标小就升高有效半径等. 接着尝试用这个人工模型的参数值作为初始参数的设置. 由于这些复杂的不规则模型的先验条件对拟合有更大的影响, 因此人工输出一个好模型的目的是提供一个好的先验条件. 需要注意的是, 除了外旋臂是根据GALEX-FUV图像进行人工模型建模的以外, 其他子结构人工模型的建模都是在Spitzer-IRAC 4.5 μm的图像上进行. 由于旋臂模型需要在Sérsic函数的基础上叠加坐标旋转或者截断函数, 自由参数要比其他能通过均匀单Sérsic函数描述的模型更多, 因此旋臂模型的参数设置需要花费比核球和盘这些规则模型更多的时间和精力, 需反复实验以保证得到一个足够真实的拟合结果. 为了保证所有解构策略的相对独立性, 不同策略的函数初始参数设置都同样按照上述方法来估计, 也就是说我们会假设每次进行新的星系解构策略的实验之前都会假设这是第1次实验.

本工作中, 我们采用经验方法来估计`GALFIT`的解构拟合误差[46, 52]. 我们在待解构图像上分别人工加上或减去1倍背景不确定性的常数值后重新拟合, 新的拟合结果将会作为误差的上限和下限, 这个方法应用于除了星等以外的所有参数的误差估计. 星等(或亮度)估计的不确定性来源不只是背景

的不确定性, 椭圆孔径误差和望远镜仪器的定标误差都是亮度不确定性的来源. 因此我们将椭圆孔径的误差、定标误差和背景不确定性的正交组合(即平方和的开方)作为星等(或亮度)的误差.

4 结果展示

本工作中, 我们采用由简单到复杂的6种模式(即6种子结构组合)在Spitzer-IRAC 4.5 μm图像上对星系进行解构:

- 单成分: Sérsic (M81整体)
- 双成分: Sérsic (M81整体)+PSF (AGN)
- 双成分: Sérsic (核球) + Sérsic (盘)
- 三成分: Sérsic (核球) + Sérsic (盘) + PSF (AGN)
- 四成分: Sérsic (核球) + Sérsic (盘) + PSF (AGN) + Coordinate rotation-Truncated-Sérsic (外旋臂)
- 五成分: Sérsic (核球) + Sérsic (盘) + PSF (AGN) + Coordinate rotation-Truncated-Sérsic (外旋臂) + Coordinate rotation-Sérsic (内旋臂)

对于每种模式, 我们都会实际测量星系整体以及各子结构成分的面亮度径向轮廓, 用来和模型进行比较. 面亮度径向轮廓的测量方法是对已去除前景星的M81图像(见图4), 画出等照度线来进行对面亮度的采样, 所有等照度线的椭圆与M81测光孔径的中心、轴比和位置角相等. 这组等照度线也统一用于所有子结构图像. 图6–11分别展示了每种解构模式的结果图像和面亮度径向轮廓, 图12是各模型子结构的拟合结果展示. 每种模式中各子结构的形态学参数值记录在表1中. 以下各小节分别呈现每种模式的结果分析.

4.1 单成分拟合(M81整体)

只用单Sérsic函数进行的单成分拟合得到M81的整体Sérsic指数为4.29. 原始图像和模型的测光结果显示, 单成分拟合的模型星等与在无前景星图像上进行孔径测光得到的结果一致(6.78 ± 0.02 mag). 表1中的光度占比的定义为在相同孔径下子结构模型图像或者所有子结构模型总和的模型图像在原星系总流量中的占比, 由于模型可能不同程度地高估或低估星系的亮度, 因此所有子结构的占比总和不严格等于100%. 在单成分拟合的结果中, M81整体的模型略微高估了M81的亮度, 因此其光度占比为100.51%. 残差图像的光度比为12.73%, 主要由残留的旋臂结构、少量的核球、盘以及其他恒星提供.

然而, 如图6所示, 只用单Sérsic函数来拟合是一种粗略用于测量星系整体性质的方法. 从图中可以看出, 模型图像低估了星系的方位角; 残差图像显示模型高估了星系在小半径区域以及旋臂间的亮度, 低估了旋臂以及星系盘上的亮度, 因此导致了旋臂间和部分旋臂被过度拟合而残差图像还剩余了不少的子结构. 面亮度径向轮廓图清晰地显示单成分拟合模型的椭率和方位角只是近似等于观测值的平值, 而无法准确地反映椭率和方位角随半径的变化趋势. 此外, 模型明显高估了M81在400″以外的亮度, 并且随着半径的增加, 模型和观测图像的匹配程度也逐渐下降. 这也说明单成分Sérsic函数在估计星系的面亮度轮廓时有缺陷, 因为星系在形态学上的复杂性导致星系整体的面亮度径向轮廓并非严格遵循某个特定函数的形式. 单成分拟合M81的形态学成分是一个过于简单的尝试.

4.2 双成分拟合(M81整体+AGN)

M81中心存在一个低光度的AGN[50]. 与寄主星系的辐射来源不同, AGN的辐射不属于任何一种星族; 但是AGN的存在可能会对星系的动力学、形态学、物理性质甚至其形成和演化产生影响[53–55]; 就观测而言, 如果不扣除AGN的贡献, 那么寄主星系的观测特征也会因AGN的存在而产生偏差. 因此, 如何在测量星系的时候扣除AGN的贡献一直都是星系研究中一个重要的问题. 本工作中, 我们尝试利用星系形态学解构将AGN和寄主星系分离.

表 1 拟合结果的参数值

Table 1 Parameter values of fitting results

Component number	Substructure	Magnitude of model	Magnitude of substructure	Flux ratio	Effective radius (r_e) / ″	Sérsic index n	Axial ratio (q)	Position angle (PA)/°
1	M81 overall	6.78 ± 0.02	6.78 ± 0.02	100.51%	$236.25^{+62.25}_{-40.30}$	$4.29^{+0.54}_{-0.44}$	$0.61^{+0.01}_{-0.01}$	$-29.25^{+0.02}_{-0.01}$
2	M81 overall	6.78 ± 0.02	6.79 ± 0.02	99.72%	$293.66^{+69.21}_{-45.68}$	$3.89^{+0.50}_{-0.41}$	$0.61^{+0.01}_{-0.01}$	$-29.16^{+0.01}_{-0.01}$
	AGN		12.28 ± 0.02	0.64%	—	—	—	—
2	Bulge	6.80 ± 0.02	7.73 ± 0.02	42.00%	$84.17^{+30.32}_{-28.51}$	$5.18^{+0.92}_{-0.81}$	$0.74^{+0.05}_{-0.01}$	$-34.47^{+0.73}_{-0.21}$
	Disk		7.40 ± 0.02	56.81%	$234.23^{+10.72}_{-10.53}$	$1.17^{+0.18}_{-0.11}$	$0.49^{+0.01}_{-0.07}$	$-27.52^{+0.38}_{-0.70}$
3	Bulge	6.80 ± 0.02	7.72 ± 0.02	42.60%	$82.49^{+38.58}_{-25.68}$	$4.89^{+1.02}_{-0.87}$	$0.74^{+0.07}_{-0.04}$	$-34.47^{+0.73}_{-0.21}$
	Disk		7.42 ± 0.02	56.06%	$237.6^{+9.75}_{-15.35}$	$1.14^{+0.67}_{-0.90}$	$0.49^{+0.02}_{-0.06}$	$-27.57^{+0.49}_{-0.54}$
	AGN		14.04 ± 0.02	0.13%	—	—	—	—
4	Bulge	6.80 ± 0.02	7.78 ± 0.02	39.85%	$80.30^{+56.31}_{-35.87}$	$5.06^{+1.24}_{-0.91}$	$0.75^{+0.01}_{-0.01}$	$-37.37^{+0.38}_{-1.01}$
	Disk		7.47 ± 0.02	53.27%	$211.5^{+12.00}_{-19.5}$	$1.20^{+1.32}_{-0.93}$	$0.48^{+0.08}_{-0.06}$	$-24.93^{+0.51}_{-0.72}$
	AGN		13.90 ± 0.02	0.14%	—	—	—	—
	Outer spiral		9.95 ± 0.02	5.42%	$460.69^{+5.02}_{-8.52}$	$1.14^{+0.03}_{-0.01}$	—	—
4	Bulge	6.80 ± 0.02	7.78 ± 0.02	40.04%	$77.25^{+50.30}_{-42.32}$	$5.11^{+1.32}_{-1.18}$	$0.71^{+0.01}_{-0.01}$	$-33.07^{+0.05}_{-0.05}$
	Disk		7.94 ± 0.02	34.53%	$292.52^{+5.07}_{-4.36}$	$0.62^{+0.12}_{-0.10}$	$0.47^{+0.04}_{-0.10}$	$-21.88^{+0.89}_{-0.91}$
	Outer spiral		9.80 ± 0.02	6.24%	$443.25^{+2.58}_{-3.56}$	$0.15^{+0.05}_{-0.02}$	—	—
	Inner spiral		8.65 ± 0.02	17.89%	$114.00^{+7.51}_{-5.81}$	$0.56^{+0.03}_{-0.05}$	—	—
5	Bulge	6.80 ± 0.02	7.77 ± 0.02	40.66%	$76.94^{+34.66}_{-30.75}$	$4.87^{+0.96}_{-1.01}$	$0.70^{+0.01}_{-0.01}$	$-33.04^{+0.05}_{-0.06}$
	Disk		7.94 ± 0.02	34.59%	$292.52^{+9.39}_{-15.57}$	$0.63^{+0.06}_{-0.13}$	$0.47^{+0.03}_{-0.09}$	$-21.87^{+0.37}_{-0.85}$
	AGN		14.04 ± 0.02	0.12%	—	—	—	—
	Outer spiral		9.79 ± 0.02	6.26%	$443.25^{+2.58}_{-3.56}$	$0.15^{+0.02}_{-0.03}$	—	—
	Inner spiral		8.71 ± 0.02	17.06%	$115.38^{+5.45}_{-3.78}$	$0.56^{+0.03}_{-0.05}$	—	—

Note: Statistics of parameters as a result of all the morphological decomposition.

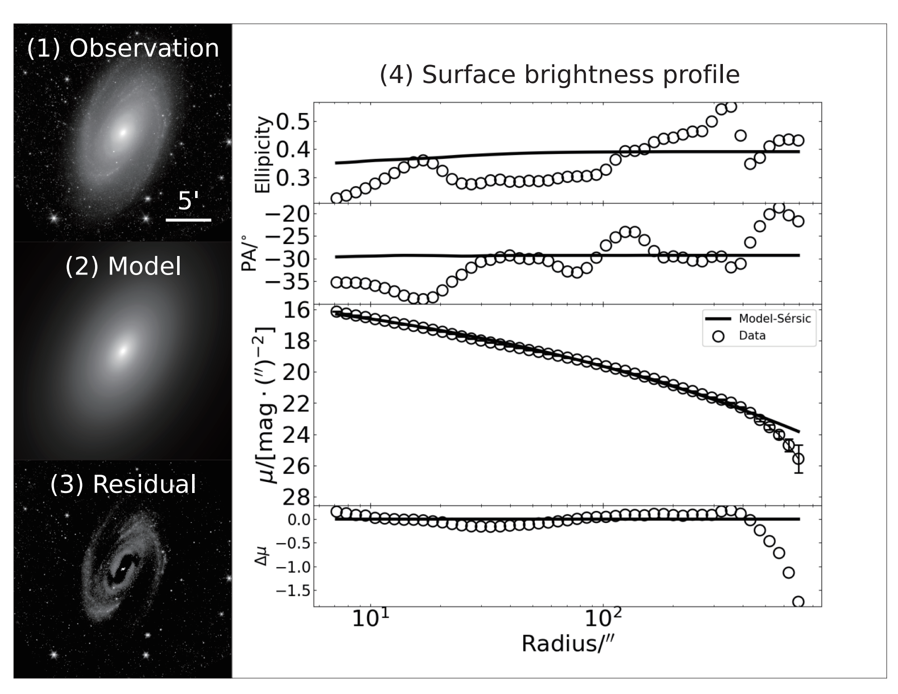


图 6　单成分的拟合结果展示. (1)表示原始图像; (2)表示模型图像; (3)表示残差图像, 由观测图像减去模型图像获得; (4)表示径向面亮度轮廓图, 包括模型和原始图像的椭率($1-b/a$, 其中a、b分别为椭圆的半长轴和半短轴), 方位角、面亮度(以mag/$('')^2$为单位)和面亮度残差的比较. 面亮度轮廓中的圆圈表示观测数据, 黑色虚线表示模型图像的数据.

Fig. 6　Results of single-component fitting. The panel (1) represents the observed image; the panel (2) represents the model image; the panel (3) represents the residual image, which is obtained by subtracting the model image from the observed image; the panel (4) represents the radial surface brightness profile, including the comparison of ellipticity ($1-b/a$, where a and b are semimajor axis and semiminor axis of ellipse respectively), the position angle, surface brightness (in unit of mag/$('')^2$) and surface brightness residual between the model and the observed images. The open circles in the surface brightness profiles represent the observational data, and the black dotted lines represent the model curves.

我们用Sérsic函数和PSF函数分别拟合M81整体以及AGN, 其结果如图7所示, 子结构图像在图12中, 子结构参数值记录在表1中. 图7显示模型图像和残差图像与单成分拟合结果相差不大; 径向面亮度轮廓也与单成分拟合的结果相近, 都是模型图像无法精准地描述椭率和方位角随半径的变化趋势; 同样, 模型的面亮度高估了距星系中心400″以外部分的亮度. 因为M81的AGN亮度低, 所以对寄主星系的影响很弱.

在表1中, AGN比M81整体暗弱很多(星等差为6 mag). 在添加了AGN成分之后M81整体的有效半径上升了24.3%; Sérsic指数下降了9.32%; 轴比和方位角几乎无变化. 添加了AGN模型之后, M81整体的光度占比下降了0.79%, 而AGN本身的亮度只占总亮度的0.64%. 变化最大的是有效半径, 这是因为考虑了AGN模型之后M81整体模型亮度的重新分配导致的, 但是变化范围比背景不确定性带来的误差要更小. 残差图像的光度比为12.38%, 与单成分拟合结果相似.

4.3　双成分拟合(核球+盘)

对于同时具有核球和盘结构的星系, 人们常用核球+盘的双成分来进行形态学解构[56–58]. M81就是这样的星系, 因此核球+盘的双成分形态学解构(两个Sérsic函数)也被我们用于6种模式之一.

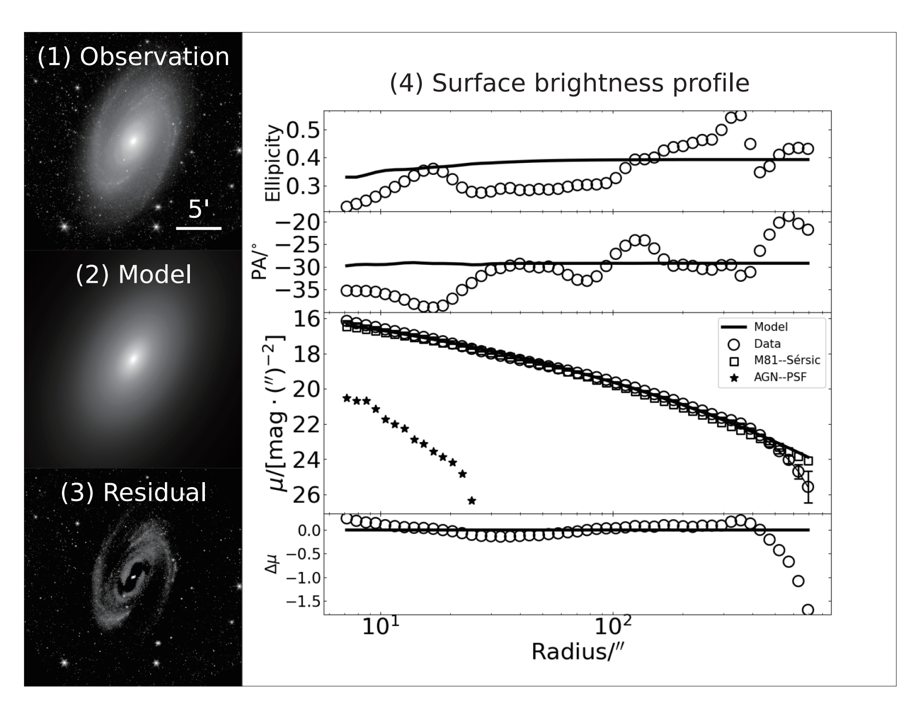


图 7 双成分(M81整体+AGN)的拟合结果展示. 图像的格式和图6相同. 面亮度轮廓中不同的线表示子结构模型的数据.

Fig. 7 The fitting results of two components (M81+AGN). The format of the image is the same as that in Fig. 6. Different lines in the surface brightness profile represent the data of the substructure model.

图8展示了双成分(核球+盘)解构的图像结果, 其中各个成分的模型图像结果可见图12. 相比单Sérsic函数的拟合结果, 双成分(核球+盘)拟合能够更好地描述M81整体和局部的形态. 从模型图像的大小、轴比和方位角都非常接近观测图像. 残差图像显示模型很好地将核球和盘从观测图像中抽离出来了, 只剩下了两条明亮外旋臂; 星系内部的内旋臂以及星系中心类似小型星系棒的结构残留在残差图像上. 同时模型的椭率和方位角的径向变化趋势与观测结果比较一致. 相比此前单Sérsic函数在半径超过400″以后径向面亮度轮廓估值偏高的情况也有所改善. 核球和盘的大小、椭率和方位角都有明显的不同, 这也是单Sérsic函数不能很好地描述M81形态的原因.

在表1中, 核球和盘之间的亮度差异不大, 只有大约0.3星等的差值; 从亮度占比来看, 核球和盘分别占据了42.00%和56.81%的流量, 两个成分亮度差别不是很大. 这说明即使是在主要探测年老恒星辐射的4.5 μm的波段上, 盘的亮度也是不可忽视的. 核球的有效半径(r_e)仅为盘的约1/3, 核球的Sérsic指数($n = 5.18$)要远大于盘的Sérsic指数($n = 1.17$), 说明虽然核球和盘的亮度相近, 但是核球集中在星系小半径区域中, 而盘的分布更为广阔和平坦. 核球和盘的轴比和方位角有显著的不同, 这也是径向面亮度轮廓图中轴比和方位角随半径变化的原因之一. 两个Sérsic函数拟合的模型图像同样可以在误差范围内精准地预测M81的亮度. 我们发现残差图像的光度占比为10.12%, 主要由剩余的外旋臂、内旋臂和其他恒星提供.

4.4 三成分拟合(核球+盘+AGN)

接着我们在核球+盘的双成分基础上添加AGN成分, 得到的结果见图9和12以及表1. 这种模式下核球和盘的结果与单纯两个Sérsic函数的结果基本一致; AGN只有大约14星等, 比核球和盘暗弱很多, 其光度占比约为0.13%. 残差图像与两个Sérsic函数的结果相比也没有明显变化, 其光度占比约为10.10%.

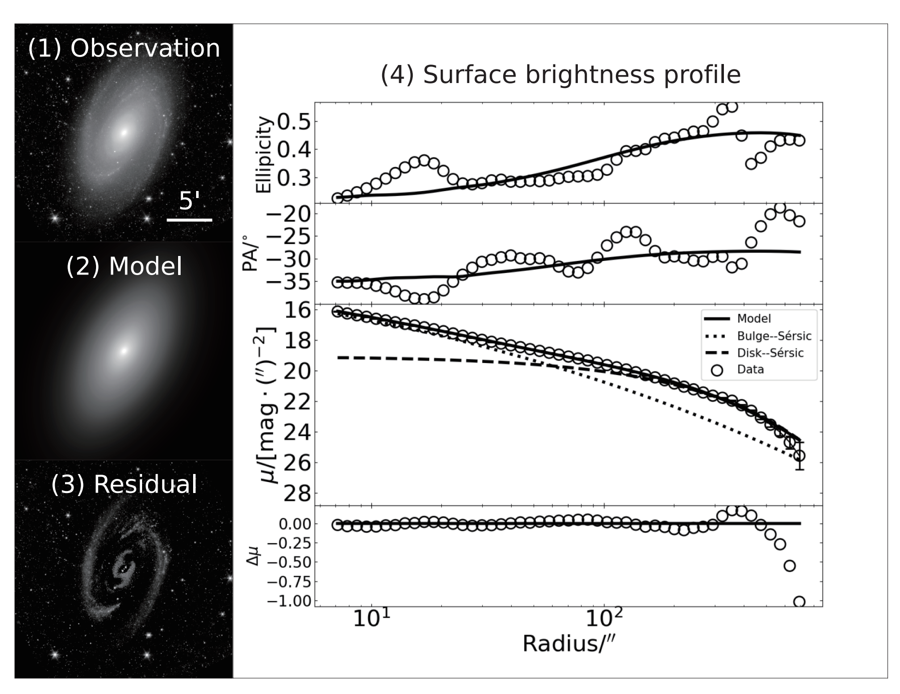


图 8 双成分(核球+盘)的拟合结果展示. 图像的格式和图6与图7相同.

Fig. 8 The fitting results of two components (bulge + disk). The format of the image is the same as that in Fig. 6 and Fig. 7.

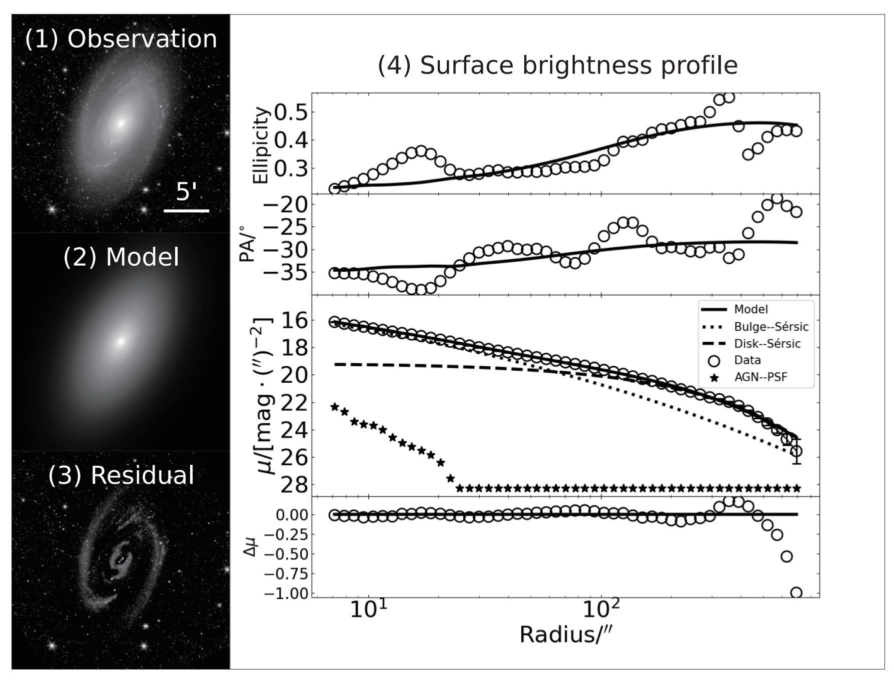


图 9 三成分的拟合结果展示. 图像的格式和图6与图7相同.

Fig. 9 The fitting results of three components. The format of the image is the same as that in Fig. 6 and Fig. 7.

4.5 四成分拟合(核球+盘+AGN+外旋臂)

之前的结果都显示在残差图像中有明显的旋臂结构, 因此在上一节解构模式的基础上增加了外旋臂成分, 即核球+盘+AGN+外旋臂的四成分解构模式(从之前的结果中看, M81的旋臂似乎有不连续的内外两段构成, 这一节的解构我们只考虑外旋臂, 下一节我们将加入内旋臂).

与其他子结构不同, 旋臂需要在均匀的Sérsic指数上叠加坐标旋转函数(6)式和截断函数(7)式, 因此旋臂的自由参数比均匀平滑的结构更多, 初始参数的设置对结果的影响更大; 同时, 在近红外波段, 旋臂可能会被其他子结构淹没, 导致初始参数的设置更加困难. 因此我们利用GALEX-FUV的图像来确定旋臂的初始参数. 具体做法是, 人工调节各参数产生一个与FUV图像一致的模型, 再用这些参数值通过简单的单位换算作为在Spitzer-IRAC 4.5 μm图像拟合时的初始参数(其中旋臂的亮度设置为比核球高2个星等). 因为外旋臂距离星系中心大约100″处截断, 所以在外旋臂的建模时需要加入截断函数.

核球+盘+AGN+外旋臂的四成分解构模式的结果见图10和12以及表1. 从图10和12中可以看出, 在添加了外旋臂之后, 模型图像与观测图像的相似度有明显提高; 残差图像中也几乎看不到外旋臂的残留, 图像中除了一些小尺度的亮恒星形成区以外只剩内旋臂. 模型的面亮度径向轮廓也能更好地拟合观测; 模型的椭率和方位角随半径变化的曲线也与观测更加一致, 同时, 此前的模型对星系外围面亮度的高估也有非常大的改善, 甚至到了接近700″的位置, 模型与观测图像的面亮度差值也只有约0.6星等. 对比单个子结构, 添加外旋臂模型前后对核球模型图像没有明显的影响; 但是添加了外旋臂模型之后, 盘的大小发生了轻微的变化.

从表1中可以看出, 旋臂的添加没有对核球和盘产生非常大的影响, 大多数参数受到的影响比背景误差更小. 变化最大的参数是盘的有效半径($r_{\rm e}$). 添加外旋臂后盘的$r_{\rm e}$下降约11%. 此外, 外旋臂的添加会使核球和盘的方位角发生细微的变化. 从光度看, 外旋臂的光度只占星系整体的5.42%, 添加外旋臂后的核球和盘的光度比都有略微下降, 而AGN没有太大变化. 残差图像的光度比约为9.15%, 主要来自内旋臂和其他恒星.

4.6 五成分拟合(核球+盘+AGN+外旋臂+内旋臂)

在以上的结果中都能看到M81存在一个内旋臂. 很多对M81的研究都发现了这个与外旋臂不连续的子结构[51, 59–60]. 这些研究结果表明, M81的内旋臂和外旋臂都遵循这同一个旋转模式, 但是组成物质可能不同. 因为内旋臂处在小半径区域, 与核球直接接壤, 所以如果不考虑该子结构, 那么在解构中来自内旋臂的光可能会被分配到核球或者盘上, 导致在结果中产生误差. 因此在这一节中我们把这个结构添加进拟合模型的形态学组成成分中.

图11展示了利用这5个形态学成分的拟合结果, 各子结构成分的模型图像结果可见图12. 相比于其他解构模式, 添加内旋臂使得模型图像和观测图像最为一致; 在残差图像中已经看不到任何明显的子结构残留. 这说明M81中明显的子结构都已被考虑进模型. 从面亮度径向轮廓上看, 模型基本能够很好地预测M81的面亮度、椭率和方位角的径向变化.

从表1中能够清晰地看出添加内旋臂后核球和盘性质的量化变化. 核球的主要变化发生在椭率和方位角上, 分别变化了6%和8%, 其他参数变化不明显. 内旋臂的添加对盘的影响非常明显: 添加了内旋臂之后, 盘的亮度下降了约0.5 mag, 有效半径($r_{\rm e}$)减小约38%, Sérsic指数n减小约50%, 光度占比下降18.68%; 而内旋臂本身的光度占比是17.06%. 这说明了在模型没有考虑内旋臂的情况下, `GALFIT`在解构时把一部分内旋臂的光分配给了盘. 除此之外其他子结构的参数值变化不明显. 残差图像的光度占比约为8.58%, 主要来自剩余的前景星和M81的其他恒星. 内旋臂的添加并不影响外旋臂的拟合结果.

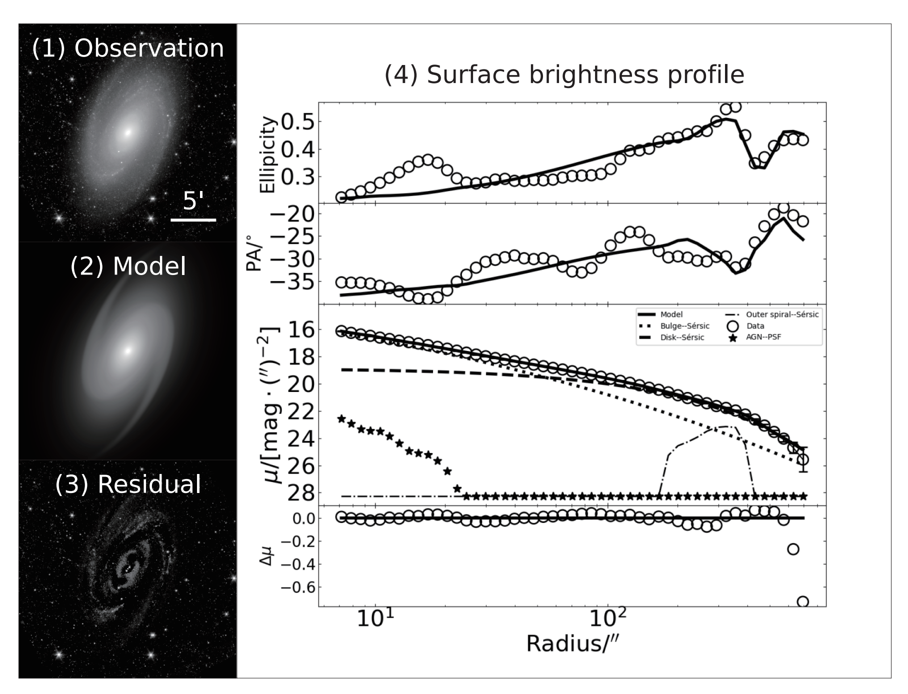


图 10 四成分(核球+盘+AGN+外旋臂)的拟合结果展示. 图像的格式和图6与图7相同.

Fig. 10 The fitting results of four components (bulge+ disk+ AGN+ outer spiral arms). The format of the image is the same as that in Fig. 6 and Fig. 7.

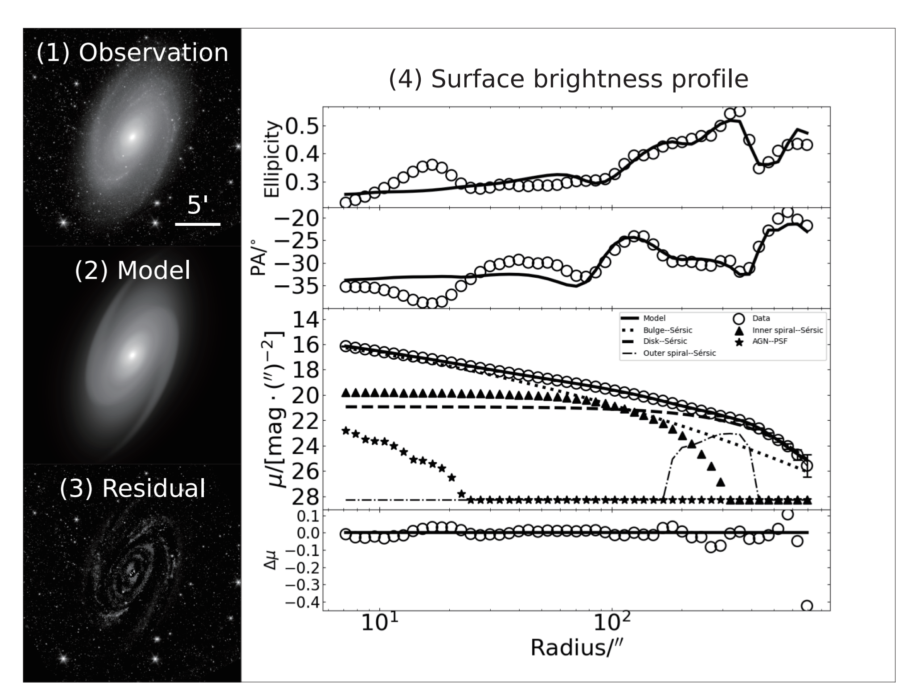


图 11 五成分的拟合结果展示. 图像的格式和图6与图7相同.

Fig. 11 The fitting results of five components. The format of the image is the same as that in Fig. 6 and Fig. 7.

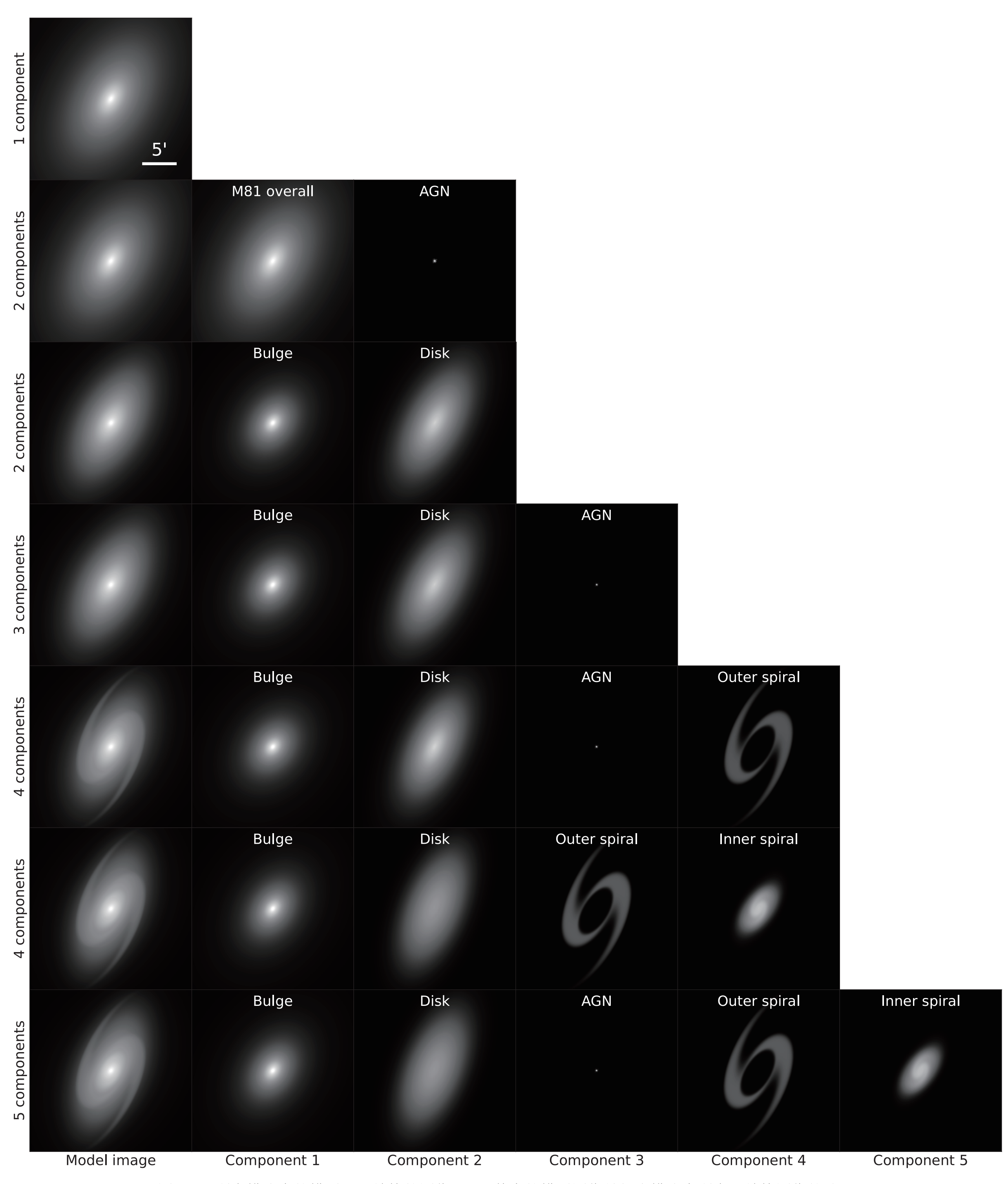


图 12　所有模式中的模型和子结构的图像展示, 其中的模型图像是相应模式中所有子结构图像的总和.

Fig. 12　Images for all models and all substructures in all the decomposition types, where the model images are a sum of the images for all the substructures in corresponding types.

5 讨论

5.1 6种星系解构模式的主要结果比较

表1记录了所有的参数值结果, 为此我们可以定量对比不同星系解构策略带来的影响. 对于模型的总星等, 除单成分模型的星等与观测图像的结果相等以外, 其他所有的解构策略都略低估了0.02星等, 这样小的偏差比背景的不确定性带来的误差还要低. 也就是说所有的星系解构策略都可以对亮度进行精准预测.

我们的结果显示实施不同的解构模式确实会导致星系整体形态学的估计产生偏差. 其中, 过于简单的单成分(单Sérsic函数)解构模式得到的Sérsic指数n为核球的值, 有效半径(r_e)为盘的值, 轴比和方位角大约是核球和盘的平均值. 这说明如同M81这样的星系是一个包含多个子结构的复杂的形态学系统, 星系的整体性质是不同子结构各自的性质的综合.

除了单成分解构模式, 其他5种形态学解构对核球的形态学参数值都没有十分明显的变化. 以每个参数的最小值为基准, 核球的光度占比、星等、有效半径、Sérsic指数、轴比和方位角的最大变化幅度分别在6.90%、0.77%、9.40%、6.36%、7.14%和13.10%, 其中除了方位角以外, 核球的参数变化比背景的不确定性带来的误差更低. 对于方位角, 核球+盘的双成分解构和核球+盘+AGN的三成分解构得到的结果一致; 而核球+盘+AGN+外旋臂的四成分解构和核球+盘+AGN+外旋臂+内旋臂的五成分解构分别升高8.41%和降低4.41%. 这个结果表明对核球方位角的估计易受旋臂的影响; 即便外旋臂不与核球重叠, 也会导致核球方位角的估计偏差大于背景不确定性.

相比于核球, 盘结构在不同的解构模式中性质变化比较大. 以各参数的最小值为基准, 盘的光度占比、星等、有效半径、Sérsic指数、轴比、方位角的最大变化幅度分别为64.52%、7.30%、38.30%、93.54%、4.26%以及26.06%. 核球+盘的双成分和核球+盘+AGN的三成分解构结果基本一致. 相比于核球+盘的双成分或核球+盘+AGN的三成分解构, 添加了外旋臂的四成分解构使上述参数的变化为6.64%、0.95%、12.34%、5.26%、2.08%以及10.59%. 而在添加了内旋臂的五成分解构结果中, 盘的上述参数分别变化了23.15%、7.30%、24.89%、85.71%、4.25%以及26.06%. 因此可以得出, 除了内旋臂, 其他子结构是否被单独拟合并不能明显影响盘的参数值. 对于方位角, 在不同解构模式中, 盘的变化比核球大, 这是因为盘与旋臂直接重叠. 内旋臂是否单独拟合对盘的各参数影响最大, 这是因为如果模型中不单独考虑内旋臂, 那么内旋臂的光会被分配于盘.

上述的所有模式的实验都表明AGN对星系整体以及各子结构的拟合影响不大. 在这6种星系解构模式当中, AGN的星等变化(以最小值为基准)都在14.33%以内, 光度占比的变化也在0.52%以内. 这说明对AGN亮度的估计也同样不易受到其他子结构的影响. 但是AGN在1个Sérsic函数+AGN的双成分解构模式结果中比其他模式结果低两个星等, 这是因为没有添加核球成分而导致对AGN亮度的高估.

5.2 不同星系解构模式的适用性

通过上述多种解构模式的实验, 我们发现对于复杂度越高的解构模式`GALFIT`运行的时间越长, 特别是有旋臂建模的坐标旋转函数以及对截断建模的截断函数参与的解构, 由于参数空间大, 因此每次拟合都需要花费比简单模型更久的时间, 对计算机配置的要求也要更高. 对旋臂或截断的建模需要人为调节参数, 这种模式对大样本星系的研究显然是有局限性的. 此外, 我们的结果显示, 添加了外旋臂和内旋臂之后, 核球和盘的参数也会发生不同程度的变化. 因此本工作可以为其他星系形态学解构研究提供一些经验参考.

在核球+盘的双成分解构和核球+盘+AGN的三成分解构中, 核球和盘的结果相差不大; 从我们的经验来看, 核球+盘的双成分解构和核球+盘+AGN的三成分解构结果均非常稳定, 不易受初始参数的影响; 即使初始参数的估计并不合理, 这两种解构模式也会得到一致合理的结果; 这两种解构的运行过程耗时最短(除了过于简单的1个Sérsic函数的单成分解构和1个Sérsic函数+AGN的双成分

解构). 通过比较这两种解构模式的结果可以发现, 是否添加PSF函数对核球和盘的拟合影响不大. 不过我们建议添加PSF函数来拟合星系核心的结构. 因为虽然对于M81来说AGN亮度不高, 但是对于那些AGN比较亮(或PSF存在比较明显外晕)的星系图像来说, PSF的添加将提高星系解构的准确性, 而添加PSF函数对整个解构的耗时影响非常小. 因此, 我们建议核球+盘+AGN的三成分拟合是最适用于大样本星系形态学解构的模式.

在我们的工作中, 核球+盘+AGN+外旋臂的四成分解构与核球+盘+AGN+外旋臂+内旋臂的五成分解构对于还原星系整体的观测特征来说最为准确, 不过这两种解构过程耗时最长, 因此比较适用于对个源星系进行深入细致研究的工作, 比如单独测量星系旋臂的参数等. 有研究认为位于核球以外的子结构(如旋臂等)对核球的形态学参数的拟合结果影响不大(相比那些位于核球附近子结构如棒等)[52]. 我们的结果部分支持这种结论, 但也有不同: 相同点是我们的核球+盘+AGN+外旋臂的四成分解构和核球+盘+AGN+外旋臂+内旋臂的五成分解构结果显示外旋臂的独立拟合与否确实对核球和盘的影响都很小, 而在五成分解构结果中核球附近内旋臂独立拟合与否对核球的影响也很小但对盘的影响却很大. 因此我们建议, 对于那些位于核球附近的子结构需要酌情考虑, 是否将它们独立拟合可能跟核球以外的子结构一样也不影响对核球的拟合, 但是会影响盘结构的拟合.

5.3 AGN的存在对星系解构的影响

AGN作为星系中心的子结构, 其亮度可能会对寄主星系的测量造成一定的影响. 本工作很重要的一部分内容就是探究AGN在不同星系解构模式中的影响. 为此, 我们实际还额外做了核球+盘+外旋臂+内旋臂四成分解构实验. 图13记录了这个实验的图像结果, 其中各个成分的模型图像见图12. 表1中也记录这个实验的参数值.

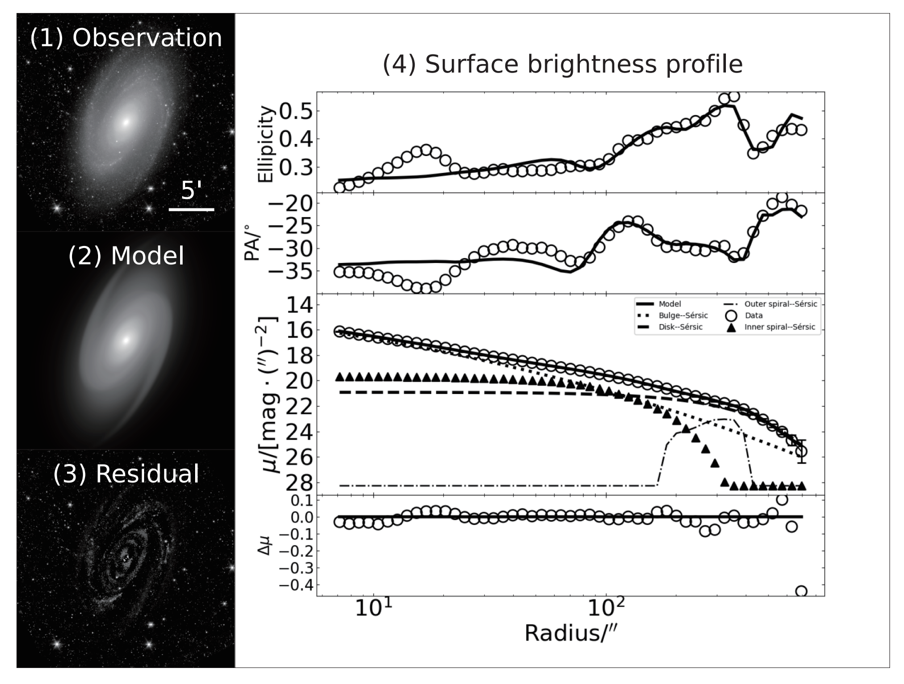


图 13 无AGN的四成分(核球+盘+外旋臂+内旋臂)的拟合结果展示. 图像的格式和图6与图7相同.

Fig. 13 The fitting results of four components (bulge + disk + outer spiral arms + inner spiral arms). The format of the image is the same as that in Fig. 6 and Fig. 7.

与核球+盘+AGN+外旋臂+内旋臂的五成分解构相比我们发现, AGN成分的独立拟合与否对各子结构成分的参数影响都非常小. 最大变化是核球的Sérsic指数, 添加了AGN之后核球的Sérsic指数下降约4.70%; 其他的参数在添加AGN之后的变化都在1%以内. 所有参数的变化都比背景不确定性带来的误差小很多. 模型图像和残差图像的对比看不出明显差别, 径向面亮度轮廓同样没有明显变化. 残差图像光度占比约8.61%, 和五成分的残差图像类似, 这些光主要来自剩余的前景星和星系中的其他恒星.

我们的实验覆盖了从简单到复杂的多种模型来讨论AGN对不同解构模式的影响, 得到的结果是添加AGN与否对各子结构参数影响均保持在约1%以内, 比背景不确定性带来的误差小. 尽管如此, 我们仍然建议独立拟合AGN (或星系核心), 因为M81的AGN是低光度的, 所以它对解构几乎不产生明显的影响. 然而, 对于高光度AGN, 预期影响还是很可观; 即便未知AGN的光度或是否存在, 我们也推荐独立拟合星系核心.

5.4 更加复杂的解构模式

在本工作中, 我们采用了不同复杂程度的6种星系解构模式, 但是我们并不认为模型包含的形态学成分越多越好. 本工作最复杂的模型是五成分子结构模型. 在五成分解构结果的残差图像中不能明显看见还有其他形态学成分, 但并不能由此下结论说M81确实由这5个子结构成分组成. 有研究表明M81的内、外旋臂本是一体, 同属于一种旋涡状子结构[59–60]. 不过在M81的紫外图像上看不见内旋臂, 这至少说明内、外旋臂有不同的星族成分. 因此, 在我们的工作中虽然区分了内、外旋臂, 但不能证明它们是独立的子结构.

确实, 添加更多的成分可能会得到更加理想的拟合结果, 但是这些子结构的动力学归属并非是形态学解构可以回答的问题. 此外, 由于一些子结构的亮度有限, 对星系的主要成分(如核球和盘)几乎没有影响, 因此我们建议, 只要研究目标不是为了专门研究这些暗弱的子结构, 在星系解构过程中不必独立拟合这些低亮度的潜在子结构.

5.5 星系解构过程中的常见问题

在最后的讨论部分, 我们为读者提供一些在本工作中汲取的经验. 首先, 我们的结果建议在开始拟合之前要了解`GALFIT`软件中图像和参数的设置, 例如通常望远镜数据官网提供的权重(Weight)图像、误差图像或噪声图像可能和`GALFIT`的要求不同, 图像输入的格式、单位与要求不一致会得到错误的结果; 其次, 我们建议拟合窗口(或视场)设置得大一些, 因为`GALFIT`构建出的模型的质量对背景敏感(不过需要注意大窗口会降低拟合的速度, 因此需要权衡拟合窗口的大小); 再次, 需要常用`GALFIT`的模型输出功能, 特别是复杂解构的时候, 提前人为构建一个与目标相像的模型能极大地提高解构效率. 最后, 可能是`GALFIT`的一个潜规则, 输出的文件名必须以字母开头而不是数字, 否则拟合无法运行. 希望这些经验能对读者有所帮助.

6 总结

本工作是一项基于Spitzer-IRAC 4.5 μm图像, 利用星系解构软件`GALFIT`对近邻早型旋涡星系M81进行形态学解构的研究, 目的是量化M81中各子结构的形态参数并探究不同解构模式对核球和盘等主要子结构拟合的影响. 我们采用了由简单到复杂的6种形态学解构模式, 结果显示, 星系整体的形态(即不独立拟合任何子结构)是星系中存在的所有子结构形态的综合, 只有进行形态学解构, 才能全面、完善地认识星系的形态以及其他相关性质. 本工作最主要的结论如下:

- M81的核球是一个Sérsic指数约为5、有效半径约1.3 kpc、轴比约为0.7、方位角约为$-34°$、视星等约为7.7 mag的经典核球, 其光度占比约为40%. 核球的这些参数值在所有的解构模式中均保持稳定, 不易被其他子结构影响.

- 对于盘结构来说, 不同形态学解构模式得到了不同的结果. 除了五成分拟合, 其他解构模式均得到M81的盘的Sérsic指数约为1.2、有效半径约为3.8 kpc、轴比约为0.47、方位角

约为−26°、视星等约为7.4 mag, 其光度占比约为56%, 它是M81在4.5 μm图像中最亮的子结构. 但是将内旋臂独立拟合后, 盘结构变得更加平坦, 这时Sérsic指数约为0.6、有效半径约为5 kpc, 光度占比约为35%, 是M81在4.5 μm波段第2亮的子结构.

- 旋臂的形态学参数相对稳定. 外旋臂和内旋臂的星等分别约为9.8 mag和8.7 mag, 光度占比分别约为6%和17%, 这两种子结构都不易受到其他子结构的影响.

- AGN在所有形态学解构模式中的结果都相对稳定. 除了单Sérsic函数+PSF的双成分拟合, AGN的星等均约为14 mag, 光度占比约为0.1%. 而在单Sérsic函数+PSF的双成分拟合结果中AGN的亮度更大(其星等约12 mag, 光度占比约为0.64%), 是由于没有核球的独立拟合而导致亮度的高估(包含部分核球光度).

通过对不同形态学解构模式的结果进行比较, 我们建议解构模式的选择取决于具体研究的目标. 大样本研究适合采用核球+盘+AGN的三成分拟合, 而对于个源星系的研究则适合更多成分(比如添加旋臂等子结构)的独立拟合. 此外, 我们发现旋臂(特别是内旋臂, 如有的话)对盘的影响非常大, 而对核球的影响很小, 因此我们建议如果想要精确测量盘的形态参数则需要考虑旋臂的影响.

这项工作是我们对M81一系列研究的开始. 接下来我们会进行M81子结构的多波段形态学研究, 量化其形态学K-改正(Morphological K-Correction), 并且运用SED拟合来探究M81星系整体及其子结构的星族成分的空间分布(二维性质). 在此基础上, 我们将尝试利用数值模拟演绎M81及其子结构的形成和演化.

致谢 我们感谢审稿人对这篇文章细致的审阅并提出具有建设性意义的意见, 这些意见让本文收获非常大的改进. 我们感谢广州大学天体物理中心全体老师对本工作的建议. 在工作中我们利用了NASA/IPAC河外星系数据库(NED)以及SAO/NASA天体物理数据系统(ADS).

参考文献

[1] Simard L, Mendel J T, Patton D R, et al. ApJS, 2011, 196: 11
[2] Hudson M J, Stevenson J B, Smith R J, et al. MNRAS, 2010, 409: 405
[3] Head J T C G, Lucey J R, Hudson M J, et al. MNRAS, 2014, 440: 1690
[4] Eggen O J, Lynden-Bell D, Sandage A R. ApJ, 1962, 136: 748
[5] Toomre A. Mergers and Some Consequences//Tinsley B M, Larson R B. Evolution of Galaxies and Stellar Populations. New Haven: Yale University Observatory, 1977: 401
[6] Dekel A, Sari R, Ceverino D. ApJ, 2009, 703: 785
[7] Ceverino D, Dekel A, Bournaud F. MNRAS, 2010, 404: 2151
[8] Kormendy J, Kennicutt R C Jr. ARA&A, 2004, 42: 603
[9] Kormendy J. ApJ, 1979, 227: 714
[10] Faber S M. The Chemical Composition of Old Stellar Populations//Tinsley B M, Larson R B. Evolution of Galaxies and Stellar Populations. New Haven: Yale University Observatory, 1977: 157
[11] Baggett W E, Baggett S M, Anderson K S J. AJ, 1998, 116: 1626
[12] Mancini C, Daddi E, Juneau S, et al. MNRAS, 2019, 489: 1265
[13] Roberts W W. ApJ, 1969, 158: 123
[14] Toomre A. What Amplifies the Spirals//Fall S M, Lynden-Bell D. The Structure and Evolution of Normal Galaxies. Cambridge: Cambridge University Press, 1981: 111-136
[15] Carlberg R G, Freedman W L. ApJ, 1985, 298: 486
[16] Fujii M S, Baba J, Saitoh T R, et al. ApJ, 2011, 730: 109
[17] Allen P D, Driver S P, Graham A W, et al. MNRAS, 2006, 371: 2
[18] Prugniel P, Simien F. A&A, 1997, 321: 111
[19] Li Z Y, Ho L C, Barth A J, et al. ApJS, 2011, 197: 22
[20] Kormendy J, Fisher D B, Cornell M E, et al. ApJS, 2009, 182: 216
[21] Dressler A, Lynden-Bell D, Burstein D, et al. ApJ, 1987, 313: 42
[22] de Vaucouleurs G. AnAp, 1948, 11: 247
[23] Freeman K C. ApJ, 1970, 160: 811
[24] Sérsic J L. Atlas de Galaxias Australes. Cordoba: Observatorio Astronomico, 1968
[25] Peng C Y, Ho L C, Impey C D, et al. AJ, 2002, 124: 266
[26] Gabor J M, Impey C D, Jahnke K, et al. ApJ, 2009, 691: 705
[27] van der Wel A, Bell E F, Häussler B, et al. ApJS, 2012, 203: 24

[28] Peng C Y, Ho L C, Impey C D, et al. AJ, 2010, 139: 2097
[29] Meert A, Vikram V, Bernardi M. MNRAS, 2015, 446: 3943
[30] Hill J K, Bohlin R C, Cheng K P, et al. ApJ, 1992, 395: L37
[31] Kong X, Zhou X, Chen J S, et al. AJ, 2000, 119: 2745
[32] Williams B F, Dalcanton J J, Seth A C, et al. AJ, 2009, 137: 419
[33] Connolly L P, Mantarakis P Z, Thompson L A. PASP, 1972, 84: 61
[34] Mao Y W, Kennicutt R C Jr, Hao C N, et al. ApJ, 2012, 757: 52
[35] Mao Y W, Kong X, Lin L. ApJ, 2014, 789: 76
[36] Lu N, Bendo G J, Boselli A, et al. ApJ, 2014, 797: 129
[37] Georgiev T B, Getov R G. SvAL, 1991, 17: 168
[38] Willner S P, Ashby M L N, Barmby P, et al. ApJS, 2004, 154: 222
[39] Barker M K, Ferguson A M N, Irwin M, et al. AJ, 2009, 138: 1469
[40] Sheth K, Regan M, Hinz J L, et al. PASP, 2010, 122: 1397
[41] Muñoz-Mateos J C, Sheth K, de Paz A G, et al. ApJ, 2013, 771: 59
[42] Querejeta M, Meidt S E, Schinnerer E, et al. ApJS, 2015, 219: 5
[43] Morrissey P, Conrow T, Barlow T A, et al. ApJS, 2007, 173: 682
[44] Fitzpatrick E L. PASP, 1999, 111: 63
[45] Schlafly E F, Finkbeiner D P. ApJ, 2011, 737: 103
[46] Huang S, Ho L C, Peng C Y, et al. ApJ, 2013, 766: 47
[47] Erwin P, Pohlen M, Beckman J E. AJ, 2008, 135: 20
[48] Salo H, Laurikainen E, Laine J, et al. ApJS, 2015, 219: 4
[49] Anderson J, King I R. PASP, 2000, 112: 1360
[50] Filippenko A V, Sargent W L W. ApJ, 1988, 324: 134
[51] Kendall S, Kennicutt R C, Clarke C, et al. MNRAS, 2008, 387: 1007
[52] Gao H, Ho L C. ApJ, 2017, 845: 114
[53] Pović M, Sánchez-Portal M, Pérez García A M, et al. A&A, 2012, 541: A118
[54] Kauffmann G, Heckman T M, Tremonti C, et al. MNRAS, 2003, 346: 1055
[55] Hopkins P F, Cox T J, Younger J D, et al. ApJ, 2009, 691: 1168
[56] Simien F, de Vaucouleurs G. ApJ, 1986, 302: 564
[57] MacArthur L A, Courteau S, Holtzman J A. ApJ, 2003, 582: 689
[58] Fisher D B, Drory N. AJ, 2008, 136: 773
[59] Feng C C, Lin L H, Wang H H, et al. ApJ, 2014, 785: 103
[60] Wang H H, Lee W K, Taam R E, et al. ApJ, 2015, 800: 106

Morphological Decomposition of the Early-type Spiral Galaxy M81 (NGC 3031)

GONG Jun-yu[1,2] MAO Ye-wei[1,2]
(1 Center for Astrophysics, Guangzhou University, Guangzhou 510006)
(2 Department of Astronomy, School of Physics and Materials Science, Guangzhou University, Guangzhou 510006)

ABSTRACT This paper presents a morphological investigation of the early-type spiral galaxy M81 (NGC 3031) through decomposition by fitting radial profiles of surface brightness using the software GALFIT, aimed at exploring structural components of M81 and quantifying their morphology. In this work, we adopt 6 types of decompositions with different numbers of morphological components, among which the most complicated one contains 5 components such as a bulge, a disk, a pair of outer spiral arms, a pair of inner spiral arms, and a galactic nucleus. The results show that, M81 hosts a classical bulge with the Sérsic index $\sim$ 5.0; the morphology and the luminosity for the bulge are almost constant in the different decomposition types. The disk of M81 has the Sérsic index $\sim$ 1.2 but the morphology and the luminosity are found sensitive to the inclusion of the inner spiral arms in the decomposition or not. The results of this work indicate that the combination of individual substructures has a considerable impact on the morphology of the galaxy as a mixture. On the basis of the results, the usability of the different types of decomposition is suggested in this work. The three-component decomposition, i.e., bulge + disk + nucleus, is applicable to statistics of large samples of galaxies; more complicated decomposition with spiral arms taken into account is suitable for precise measurements of individual galaxies in small samples. This work is based on the single-band Spitzer-The Infrared Array Camera (IRAC) 4.5 μm image. In the future, we will carry out multi-wavelength decomposition, for the purpose of investigating spectral energy distributions and stellar population properties for the galactic substructures, and thereby deduce their formation history and evolution processes.

Key words galaxies: individual: M81, bulges, galaxies: fundamental parameters: morphology, galaxies: structure, galaxies: spiral